

Ergänzung zum Beitrag in FA 1/20, S. 36 ff. „Verlustarmer Synchronwandler für einen großen Spannungsbereich“

Die heute preiswert erhältlichen kräftigen Neodym-Dauermagnete ermöglichen den Bau eisenloser, dreiphasiger Scheibengeneratoren. Zu diesem Begriff sind im Internet interessante Beiträge zu finden. Es gibt eine rege Selbstbauszene; stellvertretend sei hier [3] genannt. Basierend auf diesem Prinzip baute ich mir eine Miniaturausführung (Bild 15), bestückt mit 16 Rundmagneten (Artikel-Nr. D25 × 7mm-N42, [4]). Der Rotor lässt sich über Zahnriemen durch wechselseitiges Ziehen an zwei Handgriffen in schnelle Drehung versetzen. Die Statorspulen in Sternschaltung, gefolgt von einem Brückengleichrichter mit sechs Dioden 1N4007 (kleine Platine), liefern eine drehzahlproportionale Gleichspannung von bis zu 250 V mit etwas Restwelligkeit. Die Aufbauschriffe und Detailbilder sowie die durchgeführten Wirkungsgradmessungen sind nachfolgend beschrieben.

Der Zweck des Generators ist die Ladung eines 24-V-Bleigel-Akkumulators, der mein Gleichspannungsnetz speist. Wenn in der dunklen Jahreszeit der Photovoltaik-Ertrag knapp wird, kann etwas abendliche Armgymnastik mehr Energie erbringen als Fernsehgerät und Beleuchtung verbrauchen.

Auf der in Bild 16 dargestellten Ansteuerplatine sind die MKT-Kondensatoren C2, C3 und C5 als kleine rote Quader erkennbar. Zwecks guter Temperaturkonstanz sollten sie nicht durch Keramikausführungen ersetzt werden. Das Modul zur Ladestrommessung (Bild 17) hat keine Befestigungsbohrungen, sondern ist im Mustergerät freitragend am Zeigerinstrument montiert. Der Widerstand R_V in den Lötösen wurde zuvor so gewählt, dass das Messwerk bei testweise angelegten 6 V Vollausschlag zeigt. Das war bei $R_V = 193 \text{ k}\Omega$ der Fall. Aufgrund der hohen magnetischen Leitfä-

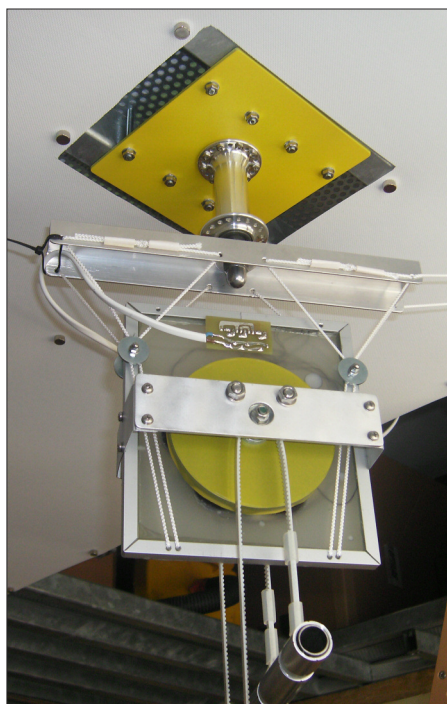


Bild 15: Der bürstenlose und rastmomentfreie Scheibengenerator erbringt bei mäßigem Kraftaufwand etwa 75 W Spitzenleistung.

higkeit des Kernmaterials der Speicherdrossel ($\mu_{\text{rel}} = 2000$) ist die Berechnung von deren Induktivität recht genau mit der Gleichung

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A_{\text{Fe}} / l \quad (8)$$

möglich, mit Windungszahl N , effektiver Kernquerschnitt $A_{\text{Fe}} = 1,8 \text{ cm}^2$ (vgl. Tabelle in [2]), Luftspatlänge $l = 0,35 \text{ mm}$. Der Rechenwert von 2,3 mH stimmt gut mit dem Messwert 2,4 mH nach der Thomson'schen Schwingungsgleichung überein. Anhand der Gleichungen 2, 3, 4 und 8 können andere Kombinationen aus Windungszahl und Luftspatlänge durchgerechnet werden, falls der Wandler mit wesentlich anderen Ein- oder Ausgangsspan-

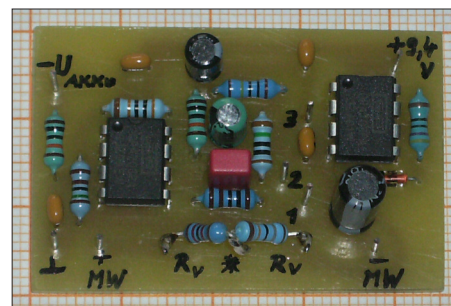


Bild 17: Modul zur Ladestrommessung gemäß Bild 12 im Beitrag

nungen betrieben werden soll.

■ Bau des Scheibengenerators

Die Dauermagnete werden auf zwei Stahlblechscheiben mit 100 mm Durchmesser fixiert. Deren Dicke betrug im Muster anfangs nur je 2 mm, um das Rotor-Trägheitsmoment möglichst gering zu halten. Bei den späteren Versuchen zeigte sich, dass der magnetische Rückschluss doch etwas knapp bemessen war. Durch je eine hinzugefügte Scheibe (erkennbar in Bild 26) ließ sich eine Erhöhung der Flussdichte im Luftspalt von 0,72 T auf 0,81 T messen, während das Streufeld auf der Scheibenrückseite von 100 mT auf 15 mT absank. Daher sollte beim Nachbau gleich eine Scheibendicke von 3,5 mm bis 4 mm gewählt werden.

Wie Bild 18 zeigt, werden zunächst vier Magnete (gleiche Pole nach unten) um genau 90° versetzt am Scheibenrand aufgesetzt und mit schnellhärtendem Zweikomponentenkleber (5-min-Epoxy, www.r-g.de) gegen Verrutschen gesichert. Danach sind vier weitere Magnete mit umgedrehter Ausrichtung in den Zwischenräumen zu platzieren. Deren Neigung, von ihren Nachbarn angezogen zu werden, kann man mit Abstandshaltern, z.B. halbierten Wäscheklammern begegnen, bis auch sie mit 5-min-Epoxy arretiert sind.

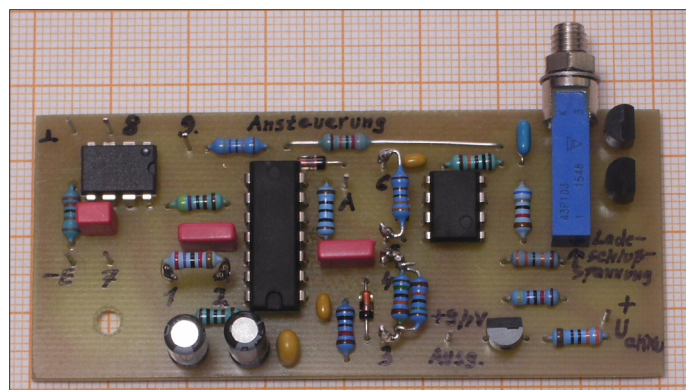


Bild 16: Ansteuermodul für den Synchronwandler gemäß Bild 11 im Beitrag

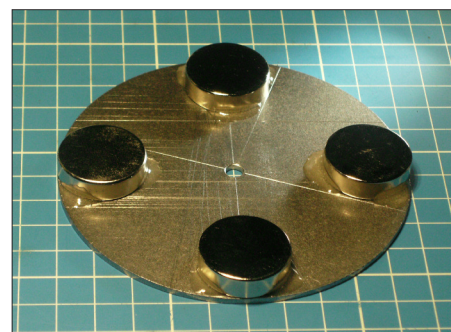


Bild 18: Fixierung der ersten Neodymmagnete auf der Stahlblechscheibe

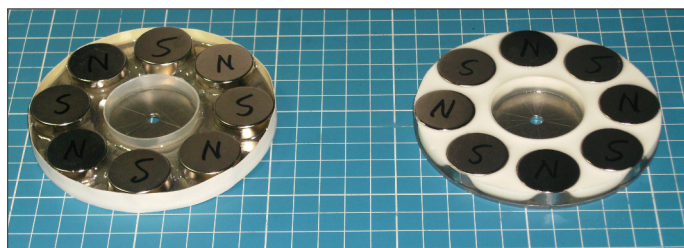


Bild 19:
Die beiden Rotor-
scheiben sind mit
16 Magneten
Dmr. 25 mm /
h = 7 mm bestückt.

Nun folgt das wasserdichte Ankleben eines äußeren und inneren Gießrandes, wie in Bild 19 links zu sehen ist. Den fertigen Verguss mit langsamhärtendem Zweikomponentenkleber, gestreckt mit weißem Glasmehl, zeigt Bild 19 rechts. Beim Hantieren sollte Vorsicht walten, denn beide bestückten Rotorplatten neigen dazu, einander heftig anzuziehen. Beim Zusammenprall können scharfkantige Splitter wegfliegen,

den, um exakt parallele Seitenflächen zu erhalten. Die Zylinderlänge entspricht der Summe aus zwei Magnetdicken ($2 \times 7 \text{ mm}$), der Dicke der Spulenwickel (6,5 mm), zwei dünnen GFK-Platten (je 0,2 mm) und zwei Luftspalten von je 1 mm, insgesamt also 22,9 mm.

Bild 20 zeigt den Wickelkörper für die nun anzufertigenden sechs Statorspulen. Auf einer M5-Schraube sitzen (v.l.n.r.) der

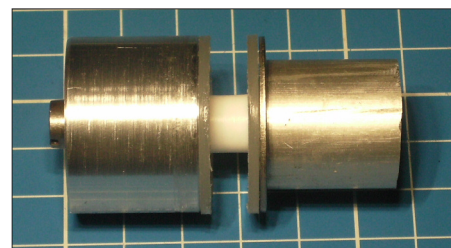


Bild 20: zusammengeschaubarer Wickelkörper für die sechs Statorspulen

Bild 21 zeigt zwei der Spulenwickel und einige andere für den Stator benötigte Teile. Wie in Bild 23 zu sehen ist, sind auf der unteren GFK-Folie mit 5-min-Epoxy anzukleben: das zum Rahmen gebogene Aluminium-U-Profil mit $8 \times 8 \text{ mm}$ als äußeren und das Kugellager als inneren Gießrand sowie die sechs Statorspulen. Jeweils zwei gegenüberliegende Spulen werden später in Reihe geschaltet und bilden eine Phase der herzustellenden Drehstrom-Sternschaltung. Die vier Drähte jeder Phase sind an vier benachbarte Pins der Stiftleiste zu löten. Es ist zeitsparender, dabei nicht erst auf die Po-

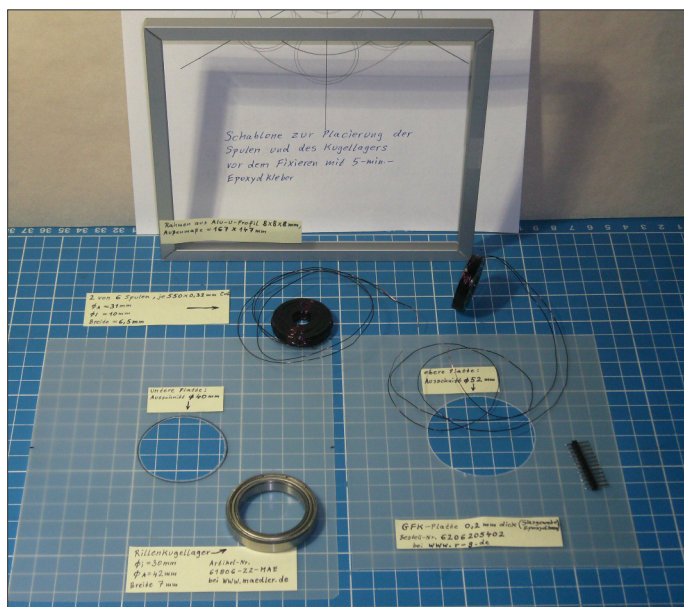


Bild 21:
Komponenten für
den Stator, mit 2
von 6 Spulenwi-
ckeln



Bild 22:
In das mittige Ku-
gellager ist der Alu-
miniumzylinder ein-
geklebt, der die Ro-
torscheiben trägt.

weshalb während der Arbeiten das Tragen einer Schutzbrille ratsam ist.

Als nächstes Teil wird ein Aluminiumzylinder mit 30 mm Durchmesser benötigt. Er muss mit wenig Spiel in ein Kugellager mit 30 mm Innendurchmesser, 42 mm Außendurchmesser und 7 mm Dicke passen. Der Zylinder bekommt eine mittig durchgehende M5-Gewindebohrung. Er muss auf einer Drehbank hergestellt wer-

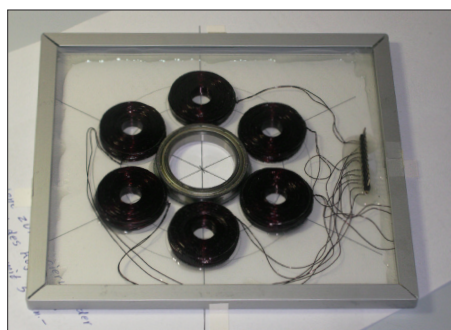


Bild 23: Ansicht des zum Vergießen vorbereiteten Stators

hierfür zweckentfremdete Aluminiumzylinder, eine Polyäthylenscheibe mit 31 mm Durchmesser, ein 10 mm dickes Teflonröhrchen mit 6,5 mm Länge, eine weitere PE-Scheibe, eine Kotflügelscheibe, zuletzt ein zweiter Aluminiumzylinder mit M5-Gewindebohrung. Dieser Aufbau sichert Maßhaltigkeit und Parallelität. Die beiden PE-Scheiben sind zusätzlich innen dünn eingefettet. Im Muster wurden nun 550 Windungen aus 0,32 mm CuL aufgebracht. Ungefähr alle 50 Wdg. erfolgte das Auftragen von vorher angemischtem langsamhärtenden Zweikomponentenkleber, der nach und nach den Wickel durchtränkt, sodass dieser nach dem Erhärten aus der demontierten Vorrichtung entnommen werden kann.

lung der einzelnen Spulen zu achten, sondern diese nachträglich am fertigen Generator festzustellen und das Layout der an die Pins anzulötenden Gleichrichterplatine (in Bild 24 oberhalb des Rotors erkennbar) entsprechend anzupassen.

Nachdem auch die Stiftleiste samt Drähten mit 5-min-Epoxy fixiert wurde, kann der Innenraum mit langsamhärtendem Harz ausgegossen werden. Sobald der Flüssigkeitsspiegel die Spulen bedeckt, ist die obere GFK-Folie aufzulegen und vom Harz benetzen zu lassen. Nun folgt wieder eine Pause bis zur Härtung des Harzes.

Nächste Schritte: Eine der Rotorplatten an den Aluminiumzylinder schrauben, diesen durch das Kugellager stecken und mit

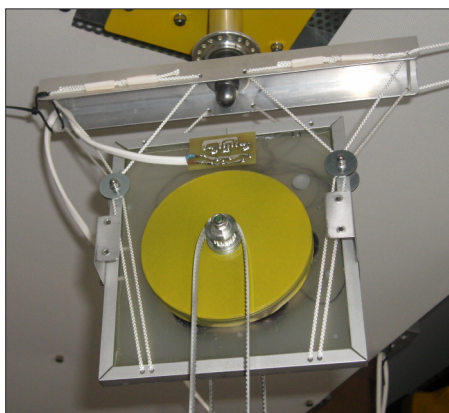


Bild 24: fast fertiggestellter Generator, noch ohne Zahnriemen-Durchrutschsicherungen

Abstandshaltern 1 mm Luftspalt zwischen GFK-Folie und Magneten herstellen. Aufbau umdrehen. In den Spalt zwischen Zylinder und Kugellager-Innenring ein paar Tropfen des langsamhärtenden Klebers einbringen. Wenn er festgeworden ist, die Rotorscheibe wieder abnehmen und mit etwas neuer Klebermischung die Fixierung mechanisch verstärken. Bild 22 zeigt dieses Stadium.

Die beiden Zahnriemenräder (für Riemen T2,5, vorgebohrt, 18 Zähne, Artikel-Nr. 16021800, [6]) wurden in der Drehbank mittig auf 4,2 mm aufgebohrt und mit M5-Innengewinde versehen, danach die Schäfte seitlich befeilt, um einen Maulschlüssel ansetzen zu können. Montage des Rotors: M5-Gewindestange in den Aluminiumzylinder schrauben, die eine Rotorscheibe wieder aufsetzen, gefolgt von einigen großen Unterlegscheiben, dann eines der Zahnriemenräder aufschrauben, vergleiche Bild 26.

Die andere Rotorscheibe vorsichtig auf die gegenüberliegende Seite setzen. Achtung: Die Anziehungskräfte sind kurz vor dem Aufsetzen beträchtlich! Dabei richten sich Nord- und Südpole der Magneten mit Nachdruck zueinander aus. Nach dem Aufschrauben des zweiten Zahnriemenrades beide Räder mit zwei Maulschlüsseln gleichzeitig kräftig anziehen, danach mit Kontermuttern fixieren.



Bild 27: Die Durchrutschsicherungen sind auf dicken, verwindungssteifen Blechen montiert.



Bild 25: Handgriffe an den Enden der Zahnriemen

Wenn richtig gearbeitet wurde, ist der Luftspalt zwischen Magneten und Stator jetzt auf beiden Seiten mit etwa 1 mm groß genug, um eine Berührung auszuschließen und eine Rotation ohne Schleifen zu gewährleisten. Es genügt tatsächlich nur ein Kugellager, denn durch dessen großen Innendurchmesser ist das Spiel bezüglich Verkippung klein genug.

Für eine symmetrische Belastung erfolgt der Antrieb beidseitig mit zwei Zahnriemen (T2, 5-Meterware, Artikel-Nr. 16060000, [6]), wie Bild 24 zeigt. Deren Befestigung an den Handgriffen (Bild 25) ist durch aufgeschobene Stücke aus passendem dickwandigen weichen Silikonisolierschlauch leicht zu bewerkstelligen. Durch wechselseitiges Ziehen an den Handgriffen wird der Rotor in schnelle Drehung wechselnder Richtung versetzt.

Nach dem 6-Dioden-Brückengleichrichter entsteht dabei eine drehzahlproportionale Gleichspannung von bis zu 250 V, mit konstanter Polarität, aber stark schwankender Amplitude. Wie daraus durch geeignete Elektronik der Ladestrom für einen 24-V-Akkumulator gewonnen wird, ist im Beitrag beschrieben.

Damit die Zahnriemen bei kräftigem Ziehen nicht durchrutschen, werden sie durch mitlaufende Kugellager (zwei je Seite) leicht an die Riemenräder gedrückt. Bild 27 ist selbsterklärend. Die Langlöcher dienen zur Justage. Während die Bleche dick und verwindungssteif sind, erfolgt deren Montage am Statorrahmen mit dünnen und flexiblen Blechwinkeln. Dadurch können die Kugellagerpaare einem eventuellen seitlichen Schlag des Rotors leicht folgen.

Falls der Generator nicht durch Ziehen an Handgriffen, sondern durch einen Kurbelantrieb bewegt werden soll – das würde 50 W bis 100 W Leistung ohne große Schwankungen ermöglichen – dann ist eine ähnlich hohe Drehzahl bis etwa 20 U/s anzustreben, weil dann Leistung und Wirkungsgrad steigen. Hier käme ein zweistufiges Zahnriemengetriebe in Betracht, des-

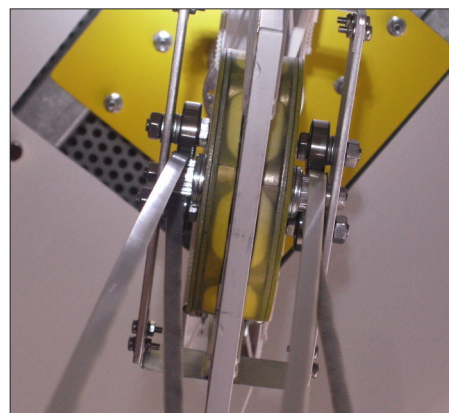


Bild 26: Unteransicht des an der Decke montierten Generators

sen Reibungsverluste aber eventuell störend hoch sind. Alternativ könnte ein Antriebsriemenrad mit 200 mm bis 300 mm Durchmesser eingesetzt werden. Weil ein solches für T2, 5-Zahnriemen bei [6] nicht im Sortiment ist, wäre seine Anfertigung mittels 3-D-Drucker eine zeitgemäße Lösung.

Der fertiggestellte und für den stationären Betrieb konzipierte Generator (Bild 15) wiegt samt Aufhängung und Handgriffen knapp 2 kg. Bei gemächlicher Benutzung lassen sich im Mittel ungefähr 30 W ohne Erschöpfung erbringen. Verglichen mit der Energiedichte geladener Li-Ionen-Akkumulatoren mit etwa 150 Wh/kg ergibt sich, dass nach etwa 10 h Betrieb der Generator ein Gewichtsäquivalent an elektrischer Energie erarbeitet hätte.

Genaugenommen müsste man noch das Gewicht des Laderegler und das des zusätzlich verbrauchten Proviant (bei 25 % Muskelwirkungsgrad etwa 1000 kcal) hinzurechnen, falls man die Option erwägt, z. B. bei einer längeren Wandertour mit Funkbetrieb statt einer größeren Li-Ionen-Powerbank eventuell einen kleinen Generator mitzuführen. Andererseits ist der hier vorgestellte Scheibengenerator nicht auf geringe Masse optimiert. Es bleibt noch Gelegenheit für Verbesserungen.

Vorversuche

Bild 28 zeigt die Messung der Flussdichte bei veränderlichem Abstand der beiden Rotorhälften, hier noch allein mit den 2-mm-Stahlblechscheiben. Das Teslometer ist in [7] beschrieben worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Bei geringer Luftspatllänge verlaufen die magnetischen Feldlinien fast homogen und die Flussdichte ist längs des Weges konstant. Bei größerem Abstand nimmt sie nicht nur erwartungsgemäß ab (vergleiche Ergänzung zu [7] im Download-Bereich auf www.funkamateurl.de, Abschnitt *Einsatz von Dauermagneten*), sondern die Feldlinienschar beult an den Rändern fassartig aus,

Tabelle 1: Messung der Flussdichte

Abstand zwischen Magneten	Flussdichte auf Magnetoberfläche	Flussdichte mittig zwischen Magneten
4,5 mm	0,90 T	0,90 T
5 mm	0,87 T	0,87 T
6 mm	0,81 T	0,80 T
7 mm	0,78 T	0,75 T
8 mm	0,75 T	0,72 T
9 mm	0,72 T	0,68 T
10 mm	0,69 T	0,63 T
12 mm	0,63 T	0,54 T
14 mm	0,60 T	0,48 T
16 mm	0,57 T	0,44 T
18 mm	0,54 T	0,36 T
20 mm	0,52 T	0,32 T
23 mm	0,51 T	0,27 T
26 mm	0,50 T	0,22 T
30 mm	0,49 T	0,17 T

sodass die Werte der zweiten und dritten Spalte immer mehr voneinander abweichen. Aber auch ein allzu geringer Abstand der beiden Rotorscheiben ist nicht sinnvoll: Die Flussdichte, die linear die bei Rotation induzierte Spannung beeinflusst, steigt nur noch wenig an, aber der Raum, der mit Kupferdraht gefüllt werden kann, nimmt mit schmalerem Luftspalt immer mehr ab. Es gibt also einen bezüglich Leistungsdichte optimalen Abstand.

Für den Test gemäß Bild 29 fand eine einlagige Testspule mit 31 mm Außendurchmesser, fixiert auf einem Plexiglasstreifen, Verwendung. Die beiden Rotorscheiben, durch den eingangs beschriebenen Aluminiumzylinder auf 8,9 mm Abstand gehalten, wurden mittels Ständerbohrmaschine in Drehung (9,1 U/s) versetzt und die Testspule im Luftspalt platziert. Die darin induzierte 36,4-Hz-Wechselspannung gelangte zum Oszilloskop, mit vorgeschaltetem Tiefpassfilter aus 1 k Ω und 1 nF gegen Störspitzen. Die Amplitude U_{SS} wurde notiert. Dann erfolgten die Entfernung der inneren Spulenwindung, eine erneute Spannungsmessung usw., bis nur noch die äußere Windung vorhanden war.

Weil die Drahtlänge der jeweils aktiven Windungen proportional zum Spulenwiderstand R ist, konnte nun die Rechengröße



Bild 28: Messaufbau zur Ermittlung der Magnetflussdichte

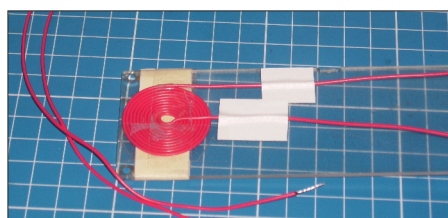


Bild 29: Messaufbau zur Ermittlung des optimalen Innendurchmessers der Statorspulen

$P = (U_{SS})^2/R$ ermittelt werden. Diese Größe, aufgetragen über den noch vorhandenen Innendurchmesser der Testspule, ergab eine Kurve mit flachem Maximum bei 10 mm bis 12 mm. Daraufhin erfolgte die Entscheidung für 10 mm Innendurchmesser der sechs zu wickelnden Statorspulen (Bilder 21 und 23), festgelegt über den Durchmesser des mittigen Teflonröhrchens in Bild 20.

Bei diesem Innendurchmesser war die Kurvenform der in der Testspule induzierten Sinusspannung sehr verzerrungsarm. Eine Klirrfaktormessung mit der FFT-Funktion des Oszilloskops ergab $k_3 = 0,5\%$ und $k_5 = 0,25\%$. Die kreisrunden Magnete und Spulen sind leicht beschaffbar bzw. herstellbar. Industrielle und semiprofessionelle Scheibengeneratoren enthalten Magnete in Trapez- oder Kreissegmentform und ebensolche Spulen. Die induzierte Wechselspannung ist dann nicht mehr sinusförmig, sondern kommt einem Rechteckverlauf näher.

■ Wirkungsgradmessungen am Generator

Hierzu wurde der Generator an der Zimmerdecke montiert. An den Gleichrichterausgang war ein Lastwiderstand angeschlossen, parallel dazu zwei Eingänge eines Digitaloszilloskops: der Kanal A mit Gleichspannungskopplung, der Kanal B mit Wechselspannungskopplung und höherer Empfindlichkeit, um die überlagerte Welligkeit noch gut erkennen zu können.

Ein zusätzlich parallelgeschalteter Ladekondensator 47 μ F/400 V war so bemessen, dass die erzeugte Gleichspannung nur noch sehr wenig Welligkeit aufwies, deren Frequenz auf Kanal B aber noch auswertbar blieb. Nun wurde der Generator durch Anhängen eines mehr oder weniger gefüllten Wassereimers an einen der Handgriffe in Gang gesetzt. Kurz vor dem Auftreffen des Eimers auf dem Boden, als der Rotor eine konstante Drehzahl angenommen hatte und somit mechanische und elektrische Leistung im Gleichgewicht standen, erfolgte das Umschalten des Oszilloskops von Run auf Stop.

Nun konnten die Höhe der Gleichspannung auf Kanal A und die Frequenz der Welligkeit f_{rip} auf Kanal B in Ruhe abgelesen werden. Letztere ist bei acht Magneten je Rotorscheibe (vier Sinusperioden je

Umdrehung) und mit der Drehstrom-Vollweggleichrichtung 24 Hz bei 1 U/s. Eine Rotorumdrehung entspricht 45 mm Zahnriemenlänge, denn das T2,5-Riemenrad hat 18 Zähne. Daraus ergibt sich die zugeführte mechanische Leistung P_m zu

$$P_m = f_{rip}/24 \cdot 0,045 \text{ m} \cdot m_E \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

Die im Lastwiderstand R_L umgesetzte elektrische Leistung ist

$$P_{el} = U^2/R_L \quad (10)$$

Mit Lastwiderständen zwischen 223 Ω und 2,38 k Ω sowie Massewerten des Eimers von $m_E = 0,21 \dots 9 \text{ kg}$ ergaben sich die in Bild 30 dargestellten Leistungen über der Drehzahl und in Bild 31 der aus dem Quotienten P_{el}/P_m errechnete Generatorwirkungsgrad η .

Der ohmsche Widerstand jeder der sechs Statorspulen wurde zu 9,1 Ω gemessen. Jede der drei Phasen hat also 18,2 Ω . Weil bei der Sternschaltung mit Gleichrichter stets zwei der drei Phasen in Reihe arbeiten, ist der Generator-Quellwiderstand 36,4 Ω . Der theoretische Maximalwirkungsgrad beträgt:

$$\eta_{max} = R_L/(36,4 \Omega + R_L) \quad (11)$$

Der Wirkungsgrad für die niedrigen Lastwiderstände ist vom Maximum gar nicht weit entfernt. Dass sie bei größeren Lastwiderständen absinken, statt weiter zu wachsen, wird von Reibungsverlusten verursacht, die bei geringerer umgesetzter Leistung prozentual stärker ins Gewicht fallen.

■ Anwendungsgebiete und Modifikationen

Für die Ladung eines 12-V-Akkumulators sind drei Widerstandswerte in der Ansteuerung (Bild 8 im Beitrag, links) zu ändern: $R_{16} = 100 \Omega$, $R_{17} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{18} = 130 \text{ k}\Omega$. Letzteres verschiebt den Bereich der einstellbaren Ladeschlussspannung zu rechnerisch 13,33 V bis 14,56 V. Weil sich bei gleicher Generatoreinspeisung der Wandlerausgangsstrom nun etwa verdoppelt, sollte R3 in der Ausgangstrommessung auf 3 k Ω erhöht oder R2 halbiert werden. Die Skala des Messwerks MW ist, abweichend von Bild 14 im Beitrag, mit 6 A Endwert zu beschriften.

Angeichts der Spannungsfestigkeit von VT1 und VT2 im Synchronwandler könnte man versucht sein, diesen direkt aus der gleichgerichteten 230-V-Netzspannung zu betreiben. Wegen der fehlenden galvanischen Trennung kann davon aber nur abgeraten werden. Denkbar wäre allenfalls das Vorschalten eines VDE-gerechten Transformators, dessen Sekundärspannung sicherheitshalber etwas niedriger liegt (etwa 180 V). Nach Graetzbrücke und Ladekondensator ergäben sich etwa 250 V Leerlauf-

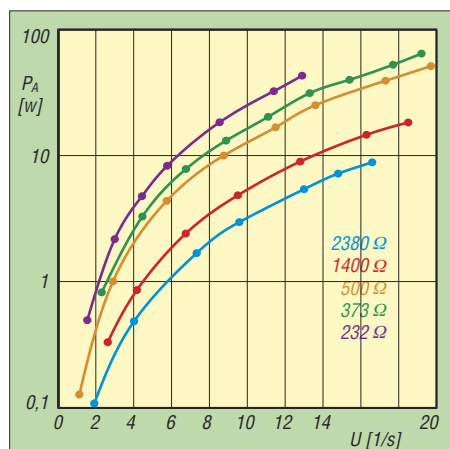


Bild 30: Leistung P_A des Scheibengenerators in Abhängigkeit von der Drehzahl U bei verschiedener Ausgangslast R_L

Gleichspannung, anzuschließen an den Eingang +E des Wandlers.

Wird das Tastverhältnis des 10-kHz-Ansteuersignals zwischen ungefähr 0,05 und 0,8 einstellbar gestaltet, so hätte man ein 100-W-Netzteil für den Bereich 12 V bis 200 V. Selbstverständlich müssen dann C11 bis C13 durch spannungsfestere Ausführungen ersetzt werden.

Interessanter für die Erzeugung solcher Spannungen, etwa zur Speisung von Röhrenschaltungen, dürfte der Betrieb als Aufwärtswandler sein: An den Ausgang ist ein 12-V- oder 24-V-Akkumulator anzuschließen, unter Zwischenschaltung einer flinken Feinsicherung. Durch Wahl des Tastverhältnisses am TTL-Eingang lässt sich gemäß (1) die gewünschte hohe Spannung nun am vormaligen Eingang +E abnehmen.

Bei dieser Betriebsart darf am TTL-Eingang niemals längere Zeit L-Pegel anliegen, weil dann T2 durchsteuern und die Akkumulatorspannung kurzschließen würde. Es ist sicherzustellen, dass zuerst das Ansteuersignal anliegt und erst dann dem Anschluss +A eine externe Spannung zugeführt wird. All diese Versuche erfordern Vorsicht, ein Mindestmaß an Erfahrung und die Kontrolle relevanter Messpunkte mit dem Oszilloskop.

Eine Spezialanwendung der Schaltung nach Bild 3 im Beitrag könnte darin bestehen, L1 wegzulassen und die am Schaltausgang S auftretende hohe Spannungssteil-

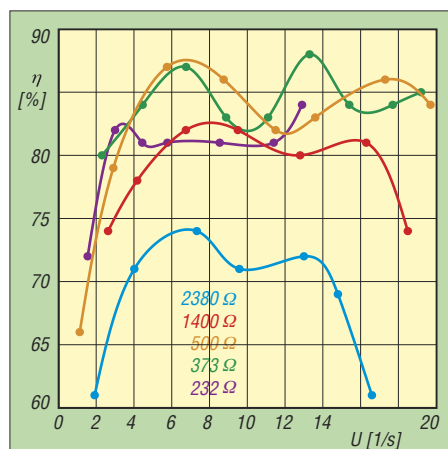


Bild 31: Wirkungsgrad η des Scheibengenerators in Abhängigkeit von der Drehzahl U bei verschiedener Ausgangslast R_L

heit (siehe Bild 5 im Beitrag) zu nutzen, z. B. als Prüfsignal oder für Experimente. Der störende 100-MHz-Burst lässt sich durch Verringerung der Ausgangslast wesentlich verkleinern.

Für die Erzeugung kalter Plasmen in Luft, wie sie u. a. zur Oberflächenbehandlung von Polyäthylen zwecks Haftung von Kleber Verwendung finden, werden kostspielige Hochspannungsgeneratoren verwendet. Eine interessante Version ist der piezoelektrische Transformator *Ceraplas* von Epcos (siehe u. a. [5]), der mit 50 kHz Sinusspannung betrieben wird und der am Ausgang bis zu 20 kV in Form einer Korona-Entladung abgibt.

Der experimentierfreudige und umsichtige Amateur könnte alternativ dazu versuchen, den Synchronwandler mit etwa 50 kHz anzusteuern, am Eingang +E etwa 200 V anzulegen und statt L1 einen auf Resonanz abgeglichenen 1:100-Transformator geeigneter Bauweise zu betreiben, mit dem Ziel, ähnliche Korona-Entladungen zu erzeugen.

Etwas bodenständiger ist der Einsatz des Synchronwandlers in der Photovoltaik. Klassische Solarmodule bestehen aus 36 oder 72 Zellen und waren ursprünglich zur direkten Ladung von 12-V- bzw. 24-V-Bleiakkumulatoren konzipiert. Bei modernen Dünnschichtmodulen mit gutem Preis-Leistungs-Verhältnis wird auf diese alte Gepflogenheit wenig Rücksicht genom-

men. Sie weisen oftmals höhere Zellenzahlen auf, verbunden mit Spannungen von 65 V, 90 V oder gar 110 V, passend zu aktuellen Wechselrichter-Modellen.

Mit der Schaltung nach Bild 3 im Beitrag kann die Akkumulatorladung, etwa im Wochenendhaus oder Wohnmobil, auch durch solch ein Dünnschichtmodul erfolgen. Im einfachsten Fall wird anhand der Modulkennlinie eine günstige Arbeitsspannung festgelegt und das gemäß (1) passende Tastverhältnis fest eingestellt.

Um den Solarertrag bei allen Temperaturen und Helligkeiten zu maximieren, bietet sich die MPP-Regelung (engl. *maximum power point*) an, wofür das Tastverhältnis variabel sein muss, um stets den Modul-Arbeitspunkt mit dem Höchstwert des Produkts $U \cdot I$ zu treffen. Hierfür gibt es verschiedene Algorithmen, die sinnvollerweise von einem Mikrocontroller ausgeführt werden. Dieser misst Spannung und Strom am Eingang des Wandlers, letzteren mittels R_{Shunt} (siehe Bild 9 im Beitrag), und erzeugt ein 10-kHz-TTL-Signal mit dem jeweils nötigen Tastverhältnis.

emmmf@gmx.de

Literatur und Bezugsquellen

- [2] Sekels GmbH: Broschüre „Amorphe Schnittbandkerne. www.sekels.de → Ringbandkerne und Schnittbandkerne → Amorphe Schnittbandkerne (AMCC, SU)
- [3] Hallenga, U.; www.kleinwindanlagen.de
- [4] Neotexx; www.neomagnete.de
- [5] Texim Europe; www.texim-europe.com
- [6] Mädler GmbH, www.maedler.de
- [7] Franke, M.: Teslameter für statische und dynamische Magnetfeldmessungen. FUNKAMATEUR 67 (2018) H. 5, S. 442–444

Tabelle 2: Leistung P_A und Wirkungsgrad η des Generators in Abhängigkeit von der Drehzahl U bei verschiedener Ausgangslast R_L

$R_L = 2380 \, \Omega$			$R_L = 1400 \, \Omega$			$R_L = 500 \, \Omega$			$R_L = 373 \, \Omega$			$R_L = 232 \, \Omega$		
U [s ⁻¹]	P_A [W]	η [%]	U [s ⁻¹]	P_A [W]	η [%]	U [s ⁻¹]	P_A [W]	η [%]	U [s ⁻¹]	P_A [W]	η [%]	U [s ⁻¹]	P_A [W]	η [%]
1,92	0,108	61	2,63	0,330	74	1,13	0,127	66	2,31	0,821	80	1,55	0,494	72
4,02	0,484	71	4,17	0,856	78	2,91	1,002	79	4,46	3,284	84	3,00	2,170	82
7,33	1,682	74	6,75	2,403	82	5,75	4,374	87	6,76	7,818	87	4,44	4,758	81
9,58	2,964	71	9,50	4,837	82	8,75	9,982	86	8,88	13,14	83	5,77	8,291	81
13,0	5,410	72	12,8	8,960	80	11,5	16,76	82	11,1	20,29	83	8,54	18,37	81
14,8	7,191	69	16,3	14,61	81	13,6	25,09	83	13,3	31,27	88	11,4	32,40	81
16,6	8,834	61	18,5	18,29	74	17,3	39,20	86	15,4	39,90	84	12,9	43,06	84
						19,7	51,20	84	17,7	52,55	84			
									19,2	64,41	85			